

LA POLLUTION DE L'AIR: CAS DE MODELISATION PAR MODELE MULTIBOITE APPLIQUE AU VALAIS

par Marc Swan et Jean-Michel Giovannoni¹

ZUSAMMENFASSUNG

Die Luftverschmutzung: eine Untersuchung durch ein Multiboxmodell im Wallis

Um die atmosphärische Zirkulation im Rhonetal besser zu verstehen, wird eine meteorologische Untersuchung durchgeführt. Die Zirkulationsvarianzen und die Vektorkorrelationen der Windmessungen werden berechnet. Die Gültigkeit eines einfachen Multiboxmodelles wird für eine meteorologische Episode getestet. Die Berechnungen zeigen die Notwendigkeit von plausiblen Hypothesen auf, um die Gesetze der Massenerhaltung der Luft respektieren zu können. Die berechneten SO₂-Immissionen stimmen mit der Wirklichkeit recht gut überein, aber die Maxima- und Minimawerte können um einen Faktor 2,5 abweichen. Bei den Emmissionen zeigt das Modell eine Sensibilität von 20% bis 30%, bei den Diffusionskoeffizienten und bei den SO₂ Randkonzentrationen eine solche von 10% - 20%. Eine Erhöhung der Anzahl Boxen begünstigt eine bessere räumliche Auflösung. Die Abweichungen zwischen den erhaltenen Resultaten von zwei Modellen, eines mit zwölf, das andere mit 33 Boxen, sind in der Nähe des Bodens maximal und erreichen 30%. Um den Hangwinden, den vertikalen Winden und den Tag-Nacht-Änderungen der Windverhältnisse rechnung zu tragen wird eine neue Konfiguration des Boxenmodelles vorgeschlagen.

INTRODUCTION

Les problèmes de pollution de l'air existent en Valais depuis de nombreuses années. La topographie valaisanne favorise des épisodes météorologiques critiques, en particulier durant l'hiver. Dans ce contexte et celui de la nouvelle Ordonnance suisse sur la Protection de l'Air de 1986, nous avons tenté une analyse météorologique et un calcul préliminaire d'immissions.

L'objectif de ce travail est de tester la validité d'un modèle multiboîtes pour le calcul des immissions de SO₂ et d'identifier les paramètres impor-

¹Institut du Génie de l'Environnement. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne.

tants. Dans cette première application, les hypothèses simplificatrices suivantes sont considérées:

- concentration stationnaire de SO₂ dans chaque boîte
- altitude stationnaire de la limite supérieure du modèle
- configuration stationnaire et unidirectionnelle du vent, sans composante

verticale

- état neutre de l'atmosphère
- pas de transformation chimique et de déposition atmosphérique.

Le travail réalisé porte sur les points suivants:

- analyse des vents sur la base de données couvrant une année
- choix d'un épisode de vent montant dans la vallée
- implantation d'un modèle à 12 boîtes cohérent avec la topographie de la

vallée du Rhône

- détermination du vent dans chaque boîte
- détermination de la distribution géographique des sources de SO₂
- calcul des immissions de SO₂ et étude de sensibilité pour différentes

valeurs de paramètres importants

- découpage du modèle à 12 boîtes en 33 boîtes et étude de l'importance du nombre de boîtes par calcul des immissions de SO₂.

La neutralité thermique de l'atmosphère n'est pas une condition très réelle pour une vallée. Le ciel étant nuageux et les vents relativement forts durant l'épisode choisi, cet état particulier est toutefois considéré durant la présente étude.

Analyse météorologique

Des données horaires de vent sont disponibles à Aigle, Sion, Montana et Visp pour l'année 1985. Les roses des vents indiquent nettement la canalisation du vent par les parois de la vallée. Des roses conditionnelles de vents sont obtenues en imposant un secteur de vent à une ou plusieurs stations. Le plus long épisode de vent partout montant a duré 37 heures pendant le mois de mars (fig. 1). Durant cette période, retenue pour la suite, le ciel était assez couvert et les bulletins météorologiques indiquent un vent à haute altitude soufflant du secteur sud-ouest. Le vecteur vent moyen, la variance circulaire et la corrélation vectorielle complètent les roses des vents. La variance circulaire représente les fluctuations de la direction du vent. Le coefficient de corrélation RV permet d'examiner la superposabilité de deux ensembles de vecteurs et d'en déduire la propagation du vent. (Pour la formulation mathématique de la variance circulaire, voir MARDIA, 1972, et pour le coefficient RV, voir ROBERT et ESCOUFFIER, 1976).

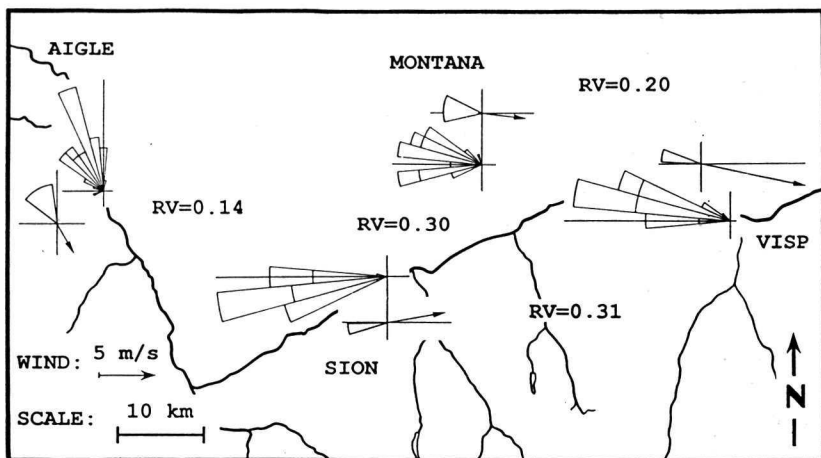


Fig. 1. Rose des vents de l'épisode météorologique choisi. Les vecteurs vent moyen, les variances circulaires et les coefficients de corrélation vectorielle sont aussi représentés.

IMPLANTATION DU MODELE ET RESULTATS

Les limites spatiales du modèle à 12 boîtes sont représentées à la figure 2. Les séparations verticales sont placées à l'endroit des stations météorologiques.

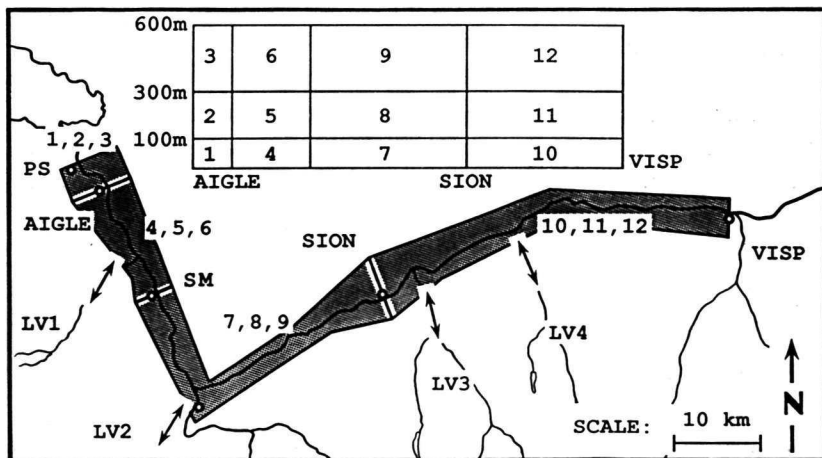


Fig. 2. Implantation du modèle dans la topographie de la vallée du Rhône. SM: St-Maurice, LV1 à LV4: vallées latérales considérées, PS: source ponctuelle dans la boîte 3.

ques pour permettre un calcul des flux d'air entre les boîtes. Une séparation est placée à St-Maurice en raison du rétrécissement brutal présenté par la vallée à cet endroit. La première pile de boîtes se justifie par la présence de l'usine de Chavalon, source ponctuelle de SO₂. L'effet des grandes vallées latérales est introduit en considérant des apports ou des pertes additionnels (LV1 à LV4). La limite supérieure du modèle est fixée à H=600 m sur sol, ce qui correspond approximativement à l'altitude du plafond nuageux hivernal. Trois hauteurs de boîtes, respectivement 100 m, 200 m et 300 m, sont choisies. Cela représente une hypothèse arbitraire sur la distribution verticale de la pollution et assure une meilleure résolution verticale au voisinage du sol. Ce modèle à 12 boîtes apparaît comme la représentation la plus simple qui puisse générer une approximation raisonnable des immissions de SO₂.

Théorie de base

Le modèle multiboîtes est dérivé des équations d'advection et de diffusion appliquées à des masses de polluants (REIQUAM, 1970; RAGLAND, 1973). Les modèles furent développés en particulier pour des zones urbaines (GIFFORD et HANNA, 1973; BENARIE, 1980), mais demeurent attractifs en d'autres situations (KUMARI, 1988; CLARK, 1988; RYAN, 1988). Les valeurs d'immissions s'obtiennent par résolution successive d'un système d'équations pour chaque pile de boîtes. On trouve une description complète de ces équations dans RAGLAND (1973). Dans le cas présent, l'équation générale de conservation de la masse s'écrit pour chaque boîte B_{ij}:

$$V_{ij} dC_{ij}/dt = Q_{ij} + FP_{i-1,j} - FP_{ij} + FL_{ij} + FT_{i,j-1} + FT_{i,j+1}$$

où C_{ij} est la concentration de polluant dans la boîte B_{ij}, g/m³, V_{ij} le volume de la boîte, m³, Q_{ij} le terme des sources, g/s, FP_{i-1,j} et FP_{ij} l'advection de polluant respectivement entrant et sortant, g/s, FL_{ij} l'échange advectif latéral, g/s, FT_{i,j-1} et FT_{i,j+1} les échanges turbulents avec les boîtes directement en-dessous et au-dessus, g/s (fig. 3).

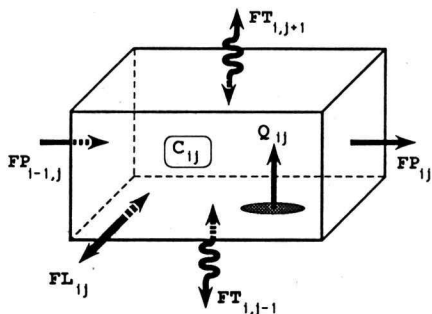


Fig. 3. Advection et échange de polluant pour une boîte B_{ij} (explications dans le texte).

Flux d'air

Des valeurs moyennes de vent déterminées durant l'épisode de 37 heures sont utilisées pour le calcul des flux d'air. Les profils verticaux de vent sont déduits d'une loi logarithmique. Pour des raisons orographiques, une fuite d'air est imposée au Val d'Iliez (LV1) avec une vitesse supposée de 2 m/s, choisie d'après la vitesse de 3 m/s à Aigle. Le flux d'air est calculé couche par couche en respectant les lois de conservation. Pour le Val de Bagnes (LV2), le modèle simule une absence quasi totale du vent au niveau inférieur et un apport dans les boîtes supérieures. Cela pourrait s'expliquer par la topographie locale et les vents dominants d'altitude du secteur sud-ouest. Le calcul montre également un apport dans le niveau inférieur avec une vitesse de 2 m/s pour les Vals d'Hérens et d'Anniviers (LV3 & LV4). Dans l'ensemble les vitesses de vent concordent avec la réalité, sauf peut-être pour Visp où l'on relève des valeurs élevées (16,5 m/s) dans la boîte supérieure. La concentration de polluant est heureusement faible à cette altitude. (Des explications plus détaillées figurent dans GIOVANNONI et SWAN, 1988).

Flux de SO₂ et concentrations calculées

Les termes de sources de SO₂ sont déduits d'un cadastre d'émissions établi par commune (LEHMANN, 1987). La présence de villages sur le flanc de

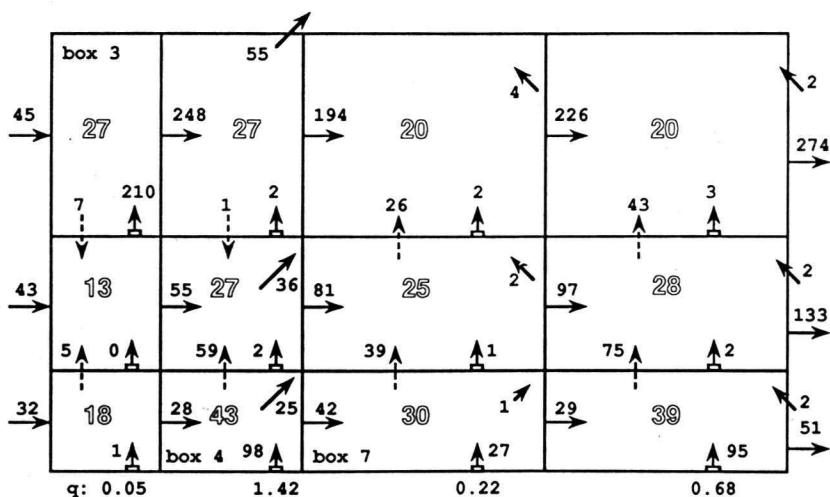


Fig. 4. Flux de SO₂ (g/s) et immissions (µg/m³). q: densité d'émission en µg/m²s, → flux advecté, ↗ flux latéraux sortant, ↖ flux latéraux entrant, ... flux turbulents, ↑ flux d'émission.

la vallée explique les émissions dans les boîtes supérieures. Comme le cadastre est exprimé en tonnage annuel de SO₂ émis, les émissions hivernales sont supposées deux à trois fois supérieures à la moyenne annuelle. Ce facteur d'émission hivernal ne concerne toutefois pas l'usine de Chavalon, dont l'émission est maintenue fixe.

Le choix de plusieurs valeurs pour les paramètres importants permet le calcul des concentrations pour plusieurs cas. La figure 4 présente les flux et les immissions de SO₂ pour un cas intermédiaire pris comme référence. La pollution maximale au niveau du sol intervient dans la boîte 4 (box 4) entre Aigle et St-Maurice et peut être associée avec la plus forte densité d'émission. La pollution dans la région entre St-Maurice et Sion (box 7), malgré une faible densité d'émission, a son origine dans le transport advectif depuis la boîte 4. L'usine de Chavalon, qui émet dans la boîte 3 (box 3) influence les immissions par advection à haute altitude et par diffusion aux altitudes moyennes.

Aucune mesure de SO₂ n'a été réalisée spécifiquement durant l'épisode étudié de mars 1985. Selon les données disponibles, les concentrations moyennes au voisinage du sol à Sion (box 7) sont de 21 et 8 µg/m³ pour février et mars 1985 respectivement. Ces valeurs ne sont pas incompatibles avec les résultats obtenus, qui doivent être comparés avec des moyennes journalières. Les valeurs journalières atteignent parfois 30 à 40 µg/m³ à la station NABEL de Sion pour les mois d'hiver 1987/88. Des mesures effectuées à la gare de Sion en avril 1988 montrent l'existence de valeurs journalières qui peuvent monter jusqu'à 20 µg/m³ (NABEL, 1987; SPE Valais, 1988). Enfin, le maximum mesuré sur une période semi-horaire à Sion est de 87 µg/m³. Au vu de ces mesures, les résultats de la figure 4 surestiment probablement la réalité, mais sont assez proches de certaines valeurs que peuvent prendre des concentrations journalières.

DISCUSSION

Sensibilité du modèle

Les paramètres retenus pour tester la sensibilité du modèle sont le coefficient d'émission hivernal, la diffusivité turbulente K et les concentrations de SO₂ aux limites. Le modèle montre une sensibilité de 20% à 30% aux valeurs d'émission (fig. 5) et de 10% à 20% aux facteurs K et aux concentrations de SO₂ aux limites.

L'augmentation du nombre de boîtes favorise une meilleure résolution spatiale. Le modèle à 12 boîtes a été subdivisé pour obtenir un modèle à 33 boîtes. Par exemple, la boîte 4 a été divisée en deux sous-boîtes, la boîtes 7

en quatre sous-boîtes. Seule la première pile reste inchangée. Les différences les plus importantes, de l'ordre de 30%, apparaissent au voisinage du sol. Les immissions diminuent fortement dans les régions rurales, aux dépens des villes ou des secteurs industrialisés (fig. 6). Dans les boîtes supérieures, les écarts sont plus faibles en raison des émissions moins importantes. La pollution produite par Chavalon est perceptible sur une plus grande distance.

1.0	1.0	1.1	1.2
1.0	1.2	1.2	1.3
1.1	1.3	1.3	1.3

Fig. 5. Sensibilité du modèle au coefficient d'émission hivernal, quotient des résultats obtenus avec un coefficient de 2 et 3 respectivement.

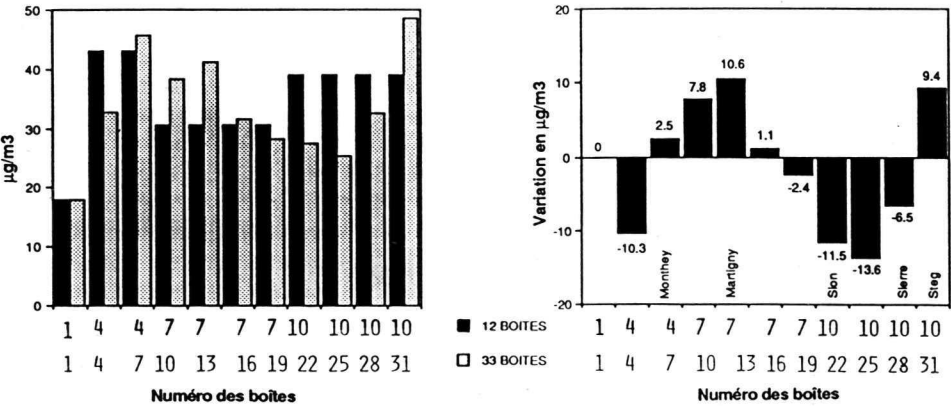


Fig. 6. Immissions calculées au voisinage du sol par un modèle à 12 puis à 33 boîtes (à gauche) avec indication des écarts (à droite).

Travaux en cours

Le modèle très simple présenté ci-dessus fait abstraction d'une réalité physique plus complexe, telle que les brises de pente qui participent de façon importante au renouvellement de l'air de la vallée. Ce phénomène, ainsi que la rotation nyctémérale des vents, nous poussent à envisager un modèle non stationnaire à géométrie complexe. La boîte considérée précédemment est subdivisée en trois sous-boîtes pour tenir compte des brises de pente (fig. 7). Des réactions chimiques simples de SO_2 et des termes de déposition seront ajoutés dans les équations.

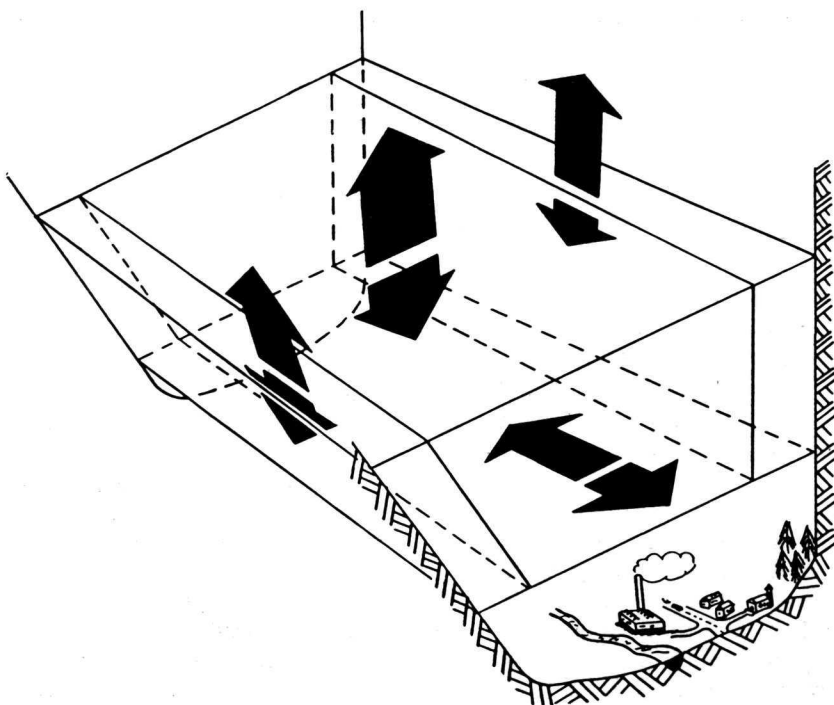


Fig. 7. Modèle multiboîtes adapté aux vallées alpines.

CONCLUSIONS

La présente étude montre la validité de l'application d'un modèle multiboîtes dans le calcul des immissions de SO_2 dans la vallée du Rhône pour un épisode météorologique donné. Lorsque les données sont disponibles, ce type

de modèle peut être un outil intéressant pour les études d'impacts en pollution de l'air et pour la planification, car il permet le choix de stations de mesure de la pollution, l'interpolation entre les stations et l'appréciation des effets d'une réduction des émissions.

Les concentrations calculées, quoique probablement surestimées, sont plausibles en regard de certaines valeurs journalières. Les résultats maximums et minimums peuvent différer toutefois d'un facteur 2,5. Cela était prévisible en raison de l'incertitude des données. Une meilleure connaissance de la répartition spatiale et des variations saisonnières des émissions apporterait une amélioration des résultats. Les valeurs d'émissions affectent les résultats de 20% à 30%. Pour les coefficients de diffusivité et les conditions aux limites, cette variation est de 10% à 20%. Un modèle non stationnaire plus complexe et plus proche de la réalité est actuellement en élaboration.

REMERCIEMENTS

Nous aimerions remercier le Service de la Protection de l'Environnement de l'Etat du Valais pour nous avoir fourni les données météorologiques et de pollution utilisées dans ce travail.

Résumé

Une analyse météorologique est réalisée en vue d'obtenir une meilleure compréhension de la circulation atmosphérique dans la vallée du Rhône. Les variances circulaires et corrélations vectorielles des mesures de vent sont calculées. La validité d'un modèle multiboîtes simple est testée pour un épisode météorologique. Les calculs montrent la nécessité d'hypothèses plausibles pour respecter les lois de conservation des masses d'air. Les immissions calculées de SO₂ concordent assez bien avec la réalité, mais les valeurs maximales et minimales peuvent différer d'un facteur de 2,5. Le modèle montre une sensibilité de 20% à 30% aux valeurs d'émissions et de 10% à 20% aux coefficients de diffusion et aux concentrations de SO₂ aux limites. L'augmentation du nombre de boîtes favorise une meilleure résolution spatiale. Les écarts entre les résultats obtenus par deux modèles, l'un à 12 boîtes, l'autre à 33 boîtes, sont maximums au voisinage du sol et atteignent 30%. Une nouvelle configuration du modèle de boîte est proposée pour tenir compte des brises de pente, des vents verticaux et de la variation nyctémérale du régime des vents.

Bibliographie

- BÉNARIE, M.M. 1980. «*Urban Air Pollution Modelling*», Mac Millan, London.
- CLARK, P.A., and A.T.COKS. 1988. Mixing Models for the Simulation of Plume Interaction with Ambient Air. *Atm. Environ.*, 22: 1097-1106.
- GIFFORD, F.A., and S.R. HANNA. 1973. Modeling Urban Air Pollution, *Atm. Environ.*, 7: 131-136.
- GIOVANNONI J.-M., et M. SWAN. 1988. *A Case Study of Air Pollution in a Swiss Valley With a Multi Box Model*, 17 th International Technical Meeting of NATO-CCMS on Air pollution Modelling and its Application, Plenum.
- KUMARI, M., and O.P. SHARMA. 1988. A Model Study for Ambient Air Quality Analysis using Routine Meteorological Observations, *Atm. Environ.*, 22: 651-661.
- LEHMANN, P. 1987. «Cadastre d'émission du canton du Valais,» rapport 67/6b, SEDE, Vevey, Suisse.
- MARDIA, K.V. 1972. «Statistics of Directional Data,» Academic Press, London.
- NABEL. 1988. *listing des mesures de l'hiver 1987-88 du réseau NABEL à Sion.*
- RAGLAND, K.W. 1973. Multiple Box Model for Dispersion of Air Pollutants from Area Sources, *Atm. Environ.* 7: 1017-1032.
- REIQUAM, H. 1970. An Atmospheric Transport and Accumulation Model for Airsheds, *Atm. Environ.* 4: 233-247.
- ROBERT, P., and Y. ESCOUFFIER. 1976. A Unifying Tool for Linear Multivariate Statistical Methods: The RV-Coefficient, *Appl. Statist.* 25: 257.
- RYAN, P.B., J.D. SPENGLER and P.F. HALFPENNY. 1988. Sequential Box Models for Indoor Air Quality: Application to Airliner Cabin Air Quality, *Atm. Environ.*, 22: 1031-1038.
- SHIR, C.C. 1973. A Preliminary Numerical Study of Atmospheric Turbulent Flows in the Idealized Planetary Boundary Layer. *J. of Atm. Sciences*, 30: 1327-1339.
- SPE-Valais. 1988. *Classeur récapitulatif de la campagne de mesure des polluants atmosphériques à la gare de Sion du 1^{er} avril au 28 mai 1988 - Sion.*